

А. С. Москаленко^{1✉}, Е. Н. Кулик¹

Оценка ресурсного потенциала территории на основе автоматизированного дешифрирования космических снимков и комплексного геоморфологического анализа

¹Сибирский государственный университет геосистем и технологий,
г. Новосибирск, Российская Федерация,
e-mail: trsnkn116@yandex.ru

Аннотация. В статье представлена методика комплексной оценки ресурсного потенциала территории на основе применения автоматизированного дешифрирования данных дистанционного зондирования Земли и геоморфологического анализа. Актуальность исследования обусловлена необходимостью оптимизации геологоразведочных работ на обширных и труднодоступных территориях. Подробно описан алгоритм автоматизированного выделения линеаментов – ключевых индикаторов глубинных геологических структур (разломов, зон трещиноватости), сигнализирующих о размещении месторождений полезных ископаемых и геодинамических рисках. Методика базируется на последовательном применении методов фильтрации (Собеля, Канни), бинарно-морфологической эрозии и преобразования Хафа к космическим снимкам (Landsat-8/9, Sentinel-2) и цифровым моделям рельефа (SRTM). Обоснована необходимость проверки автоматизированных результатов через комплексный анализ производных рельефа. На примере линеаментного каркаса Черноморского региона (Крит-Мурат-Апратский суперлинеament, Динаро-Эллинская и Драва-Дунай-Камчинская системы) показана эффективность предлагаемой методики. Она позволяет повысить достоверность выделения тектонических структур и может быть использована для прогноза локализации полезных ископаемых, оценки гидрогеологических условий.

Ключевые слова: линеamentный анализ, дистанционное зондирование Земли, ресурсный потенциал, автоматизированное дешифрирование, геоморфологический анализ, геоинформационные технологии, цифровые модели рельефа, цифровая обработка снимков

A. S. Moskalenko^{1✉}, E. N. Kulik¹

Assessment of the territory resource potential based on automated interpretation of space images and complex geomorphological analysis

¹Siberian State University of Geosystems and Technologies, Novosibirsk, Russian Federation,
e-mail: trsnkn116@yandex.ru

Abstract. The article presents a methodology for the integrated assessment of the territory's resource potential based on the application of automated interpretation of remote sensing data and geomorphological analysis. The relevance of the study is due to the need to optimize geological exploration works in vast and hard-to-reach territories. The algorithm of automated lineament extraction – key indicators of deep geological structures (faults and fractured zones) signaling the location of mineral deposits and geodynamic hazards – is described in detail. The methodology is based on the sequential application of filtering methods (Sobel, Canny), binary morphological erosion, and the Hough transform to satellite images (Landsat-8/9, Sentinel-2) and digital elevation models (SRTM). The necessity of verifying automated results through a comprehensive analysis of relief derivatives is substantiated. The effectiveness of the proposed methodology is shown using the

example of the lineament framework of the Black Sea region (the Crete-Murat-Ararat superlineament, the Dinaric-Hellenic and Drava-Danube-Kamchia systems). It allows increasing the reliability of tectonic structure identification and can be used for predicting mineral localization and assessing hydrogeological conditions.

Keywords: lineament analysis, remote sensing of the Earth, resource potential, automated interpretation, geomorphological analysis, GIS technologies, digital elevation models, digital image processing

Введение

В условиях увеличения масштабов недропользования и необходимости освоения новых, в том числе труднодоступных, территорий разработка эффективных и экономически обоснованных методов оценки ресурсного потенциала становится приоритетной научно-практической задачей. Традиционные методы геологической съемки, несмотря на высокую точность, характеризуются значительными временными и финансовыми затратами, что ограничивает возможность их оперативного применения на региональном уровне.

Наиболее эффективными в данном случае оказываются методы дистанционного зондирования Земли (ДДЗ), основанные на анализе данных космической съемки и цифровых моделей рельефа (ЦМР). Современный этап развития ДДЗ характеризуется переходом от визуального дешифрирования к автоматизированным методам. Однако автоматическое выделение геологических структур (линеаментов) связано с проблемой появления «ложных» объектов (дороги, границы полей, антропогенные сооружения), что требует разработки комплексных подходов к интерпретации результатов.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются линеаменты – линейные элементы ландшафта, проявляющиеся в рельефе, гидросети и растительном покрове. Линеаменты выступают в качестве индикаторов глубинных геологических структур (разломов, зон трещиноватости, тектонических швов) и указывают на возможное размещение месторождений полезных ископаемых, а также позволяют определить инженерно-геологические условия территории. Предметом исследования является технология автоматизированного выделения и геоморфологического распознавания линеаментов на основе комплексного анализа ДДЗ Земли (космических снимков среднего и высокого разрешения) и цифровых моделей рельефа, реализованная в среде геоинформационных систем.

Научная новизна исследования заключается в теоретическом обосновании комплексного подхода к оценке ресурсного потенциала территории, интегрирующего методы автоматизированного дешифрирования космических снимков и геоморфологического анализа. В рамках данного подхода в настоящее время разрабатывается и структурируется алгоритм автоматизированного выделения линеаментов, включающий последовательное применение методов цифровой обработки изображений, выполняющих подчеркивание границ, проявляющихся резкими перепадами яркости (фильтрация Собеля, Канни); бинаризацию; морфо-

логическую эрозию и преобразование Хафа; который адаптируется для анализа данных ДЗЗ различного пространственного разрешения. Следующим этапом ведется подбор и проверка геоморфологических критериев для тестирования достоверности автоматизированных результатов. Разрабатываемые критерии базируются на изучении производных ЦМР (теневой рельеф, кривизна поверхности, дренажная сеть) и направлены на отсев ложных структур антропогенного и экзогенного происхождения.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения разработанной методики для прогноза пространственной локализации полезных ископаемых, оценки гидрогеологических условий, а также для оптимизации геологоразведочных работ (сужение поисковых площадей на долевой стадии, сокращение временных и финансовых затрат). Результаты исследования могут быть адаптированы в практику работы геологических служб, а также использованы в учебном процессе при подготовке специалистов в области геодезии и дистанционного зондирования.

Для задач линеamentного анализа наибольшую ценность представляют мультиспектральные снимки среднего разрешения, позволяющие выявлять спектральные аномалии, связанные с зонами трещиноватости; панхроматические снимки высокого разрешения, обеспечивающие детальное отображение геоморфологических признаков; а также глобальные цифровые модели рельефа (например, SRTM) и их производные (уклоны, экспозиции, кривизна), являющиеся основой для геоморфометрического анализа.

Геоинформационные системы представляют собой инструментальную среду, объединяющую возможности хранения, обработки, анализа и визуализации пространственных данных. В рамках линеamentного анализа ГИС-технологии позволяют осуществлять пространственную интерпретацию (распознавание линеamentов, выявление узлов пересечения); проводить оверлейные операции (наложение векторных линеamentов на геологические, геоморфологические карты); выполнять статистическую обработку; а также визуализировать результаты в виде тематических карт (карты плотности линеamentов, карты тектонических структур).

Исходные данные

К исходным данным для линеamentного анализа предъявляется ряд требований, касающихся пространственного разрешения, спектрального диапазона, временной актуальности, радиометрического качества и геометрической точности. Пространственное разрешение должно соответствовать масштабу выявляемых структур: 30-90 м для региональных линеamentов и 10-15 м для локальных. При выборе спектрального диапазона предпочтение отдается ближнему и коротковолновому инфракрасному, поскольку в них наиболее контрастно проявляются зоны тектонических нарушений. Что касается временной актуальности, необходимо использовать снимки разных сезонов для компенсации сезонных изменений растительного покрова. Радиометрическое качество предполагает отсутствие облачности, минимальный уровень шумов и проведение атмосферной

коррекции. Не менее важно и требование геометрической точности, предполагающее наличие географической привязки для корректного совмещения с геологическими картами.

Сбор исходных данных для линеаментного анализа включает следующие этапы: поиск и загрузка данных с использованием открытых геопорталов для подбора снимков с минимальной облачностью; геометрическая коррекция – приведение к единой проекции для обеспечения пространственной совместимости разновременных слоев; усиление информативности изображения с помощью анализа главных компонент (РСА) и декореляционного растяжения для выделения скрытых линейных аномалий; а также создание производных ЦМР (расчет уклонов, экспозиций, кривизны, моделей теневого рельефа) для подготовки данных к геоморфологическому анализу.

Методы

Автоматизированное выделение линеаментов строится на последовательном применении методов цифровой обработки изображений. Фильтрация Собеля – дискретный дифференциальный оператор, вычисляющий приближенное значение градиента яркости изображения, используется для первичного выделения границ линейных объектов. Его преимуществами являются простота реализации и высокая скорость вычислений, недостатками – чувствительность к шуму и формирование «утолщенных» границ.

Алгоритм Канни – многоэтапный оптимальный детектор границ, включающий сглаживание (фильтр Гаусса), вычисление градиента, подавление немаксимумов и двойную пороговую фильтрацию. Он обеспечивает высокую точность локализации границ и формирование линий толщиной в один пиксель.

Бинарно-морфологическая эрозия – операция математической морфологии, удаляющая граничные точки бинарных объектов, применяется для подавления мелких шумовых артефактов и уменьшение толщины линий перед этапом векторизации.

Преобразование Хафа – это метод компьютерного зрения, позволяющий находить на изображении прямые линии. Суть метода сводится к регистрации: каждый короткий отрезок (штрих) регистрируется для определенного направления и положения прямой. Те отрезки, которые лежат на одной линии, показывают максимальную частоту регистрации и объединяются в сквозной линеамент.

Обсуждение

Автоматизированное выделение требует обязательной геоморфологической интерпретации для отсева ложных структур. Комплексный анализ включает построение карт теневого рельефа с различными азимутами освещения для выявления линейных уступов и гряд; расчет горизонтальной и вертикальной кривизны поверхности для идентификации зон перегибов склонов, характерных для разломов; выделение водосборных бассейнов и построение карт суммарного стока, при котором прямолинейные участки речных долин служат дополнительным подтверждением тектонической природы линеаментов; а также сопоставле-

ние с геологическими и геофизическими картами для установления соответствия выделенных структур известным разломам.

Заключение

Разработанная теоретико-методологическая база позволяет сформулировать основные принципы комплексной оценки ресурсного потенциала территории на основе интеграции автоматизированного дешифрирования космических снимков и геоморфологического анализа. Определенный объект и предмет исследования задают границы применимости методики. Сформулированная научная новизна отражает вклад в развитие теории линеamentного анализа. Практическая значимость обосновывает востребованность результатов для геологоразведочных, гидрогеологических и инженерно-геологических задач. Разрабатываемый алгоритм обработки данных ДЗЗ и ГИС-анализа создает основу для последующей апробации на конкретных территориях и может быть адаптирован для различных геодинамических условий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Hobbs, W. H. Lineaments of the Atlantic border region / W. H. Hobbs. – Текст : электронный // Bull. Geol. Soc. Amer. – 1904. – Vol. 15. – P. 483–506.
2. Философов, В. П. Основы морфометрического метода поисков тектонических структур / В. П. Философов. – Саратов : Издательство Саратовского университета, 1975. – 232 с. – Текст : электронный.
3. Ласточкин, А. Н. Рельеф земной поверхности: принципы и методы статической геоморфологии / А. Н. Ласточкин. – Ленинград : Недра, 1991. – 340 с. – Текст : электронный.
4. Чернова, И. Ю. Автоматизированный линеamentный анализ : учебно-методическое пособие / И. Ю. Чернова, И. И. Нугманов, Р. И. Кадыров. – Казань : Казанский (Приволжский) федеральный университет, 2012. – 38 с. – Текст : электронный.
5. Canny, J. F. A Computational Approach to Edge Detection / J. F. Canny. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1986. – Vol. 8, No. 6. – P. 679–698.
6. Galamhos, C. Progressive probabilistic Hough transform for line detection / C. Galamhos, J. Matas, J. Kittler. – Текст : непосредственный // Proc. IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. – 1999. – P. 554–560.
7. Фам Суан Хоан. Разработка технологии автоматизированного обнаружения и анализа линеamentов и кольцевых структур на космических изображениях : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Фам Суан Хоан. – Москва : МИИГАиК, 2012. – 24 с. – Текст : электронный.
8. Купцова, О. В. Методика выявления дизъюнктивных нарушений по данным дистанционного зондирования Земли с использованием линеamentного анализа / О. В. Купцова. – Текст : электронный // Мониторинг. Наука и технологии. – 2021. – № 1 (47). – С. 6–13.
9. Купцова, О. В. Разработка технологии дешифрирования изображений для выявления разрывных нарушений с использованием геофизических данных : дис. ... канд. техн. наук / О. В. Купцова. – Новосибирск : СГУГиТ, 2022. – 132 с. – Текст : электронный.
10. Иванова, Ю. Н. Применение спутниковых данных Landsat-8 с целью прогнозирования рудной минерализации для северных территорий / Ю. Н. Иванова, И. О. Нафигин. – Текст : электронный // Исследование Земли из космоса. – 2023. – № 1. – С. 24–40.
11. Зверев, А. В. Применение автоматизированного линеamentного анализа космических снимков при поисках нефтегазовых месторождений, прогнозе землетрясений... / А. В.

Зверев, А. Т. Зверев. – Текст : электронный // Известия вузов. Геология и разведка. – 2015. – № 6. – С. 14–20.

12. Шевырев, С. Л. Программа LEFA: автоматизированный структурный анализ космической основы в среде Matlab / С. Л. Шевырев. – Текст : электронный // Успехи современного естествознания. – 2018. – № 10. – С. 138–143.

13. Покалюк, В. В. Тектонолинеamentный каркас Причерноморского региона и сопредельных территорий / В. В. Покалюк, И. Э. Ломакин, В. Г. Верховцев, В. В. Кочелаб. – 2021. – Т. 8, № 1. – С. 26–44. – Текст : электронный.

14. Стрихарчук, М. Ю. Глубинное строение и тектоника Черноморской впадины / М. Ю. Стрихарчук. – Текст : электронный // Геофизический журнал. – 2018. – Т. 40, № 5. – С. 80–101.

© А. С. Москаленко, Е. Н. Кулик, 2026